

철도 배전계통 구성방안에 관한 연구

오광해 김주락 이한민
(한국철도기술연구원)

A Study on the Configuration Schemes for Railway Power Distribution System

Kwanghae Oh Joorak Kim Hanmin Lee
(Korea Railroad Research Institute)

Abstract - This study presents the configuration schemes for railway power distribution system. The possible alternatives are derived and reviewed on the basis of power quality, reliability, and economic aspects.

본 절에서는 이러한 점에 주안점을 두고 시뮬레이션을 실시하였으며, group별로 수전을 받는 기존의 철도배전계통을 사용하여 6.6kV와 22kV 및 22.9kV 배전전압을 상정하여 각 계통에서의 전압강하와 충전전류를 계산하였다.

1. 서 론

2.1.1 시뮬레이션 입력자료

철도의 고압배전설비는 열차 안전운행을 위한 신호전원의 역할을 차지하더라도 승객에 대해 가장 밀접하게 서비스를 제공하는 전원설비로서 정거장의 조명, 동력 냉난방, 환기 등을 위한 중요한 전원역할을 담당하고 있다. 근래에는 대 승객서비스의 중요도가 인식되면서 역사내 전기에너지 사용이 증가되고, 민자역사의 출현, 기존선 및 고속철도 연계망 전철화 건설의 가속화, 고빈도 열차운행을 위한 신호설비 확충 등 철도 배전계통 운용여건이 크게 변화하고 있다. 이에 현재와 향후의 철도 산업현황에 맞는 철도 배전계통 시설기준을 수립함으로써 필요한 신뢰도를 유지하면서도 경제적인 건설 및 개량사업의 방향을 설정할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 철도 배전계통의 전압과 배전방식을 다각적인 측면 즉, 계통의 전력공급성능 측면(전용 해석프로그램에 의한 정량적 평가), 경제성 측면(내용년수와 할인율, 물가 상승률을 고려한 정량적 평가), 신뢰도 측면으로 검토하여 최적의 철도 배전계통 구성 대안을 선정하도록 하였다.

시뮬레이션 조건은 다음 표 1과 같이 배전전압별, 배전선로별, 수도권/외별, 그리고 지상/하 및 전철/비전철별로 구분하여 총 24가지의 경우에 대하여 수행하였다. 여기서 철도청 평균수용률은 20%수준이며, 부동률은 1.365, 최대 배전거리는 전철구간이 65.6km(영동선 춘양 3,000kW ~ 동백산 500kW), 비전철구간이 60.0km(호남선 서대전 1,500kW ~ 강경 400kW)이다.

표 1 전압강하, 충전전류 시뮬레이션 조건

구분	평균배전거리	평균수전용량	역당평균수전용량	1수전개소평균역수	역간평균거리	
	km	kW	kW	역	km	
수도권	지하전철	5.8	5,222	1,679	3.1	1.9
	지상전철	13.3	3,493	499	7.0	1.9
	소계	9.5	4,357	862	5.0	1.9
기타구간	전철구간	34.7	1,143	170	7.8	5.2
	비전철구간	36.6	540	98	5.5	6.7
	소계	37.6	747	268	5.8	6.1

* 평균수용률 : 20%적용
 * 부동률 : 1.365
 * 배전선로 선중 : 지중(가공) 100(58)mm를 기준.
 * 배전선로 회선 : 1회선 운전을 모의(최악의 경우함).
 * 부하조건 : 모든 역에서 부하설비가 최대인 경우를 고려함.
 단, 6.6kV의 경우는 실적부하율을 고려함

2. 철도배전계통의 전력공급성능 검토

철도배전 계통은 노선을 따라 비교적 장거리의 선상으로 분포되어 있고 부하 역시 변동 특성이 같지 않으며, 각개의 배전 선로를 개별적으로 조정할 수 없다는 여러 가지 문제점이 있어 전압 조정의 어려움이 있다. 따라서 효율적인 전압 조정 방법으로서의 변전소에서의 송출 전압의 적절한 방법 선택과 배전 선로 자체의 조정(전압강하의 적정배분, 배전선로 구성등)을 병행해서 종합적으로 실시해 나가는 것이 바람직하다.

전압강하 계산결과를 다음 표 2에 보인다.

표 2 전압강하 계산결과

배전전압	배전선로	지역별	구간구분	전압강하 (kV)	평가
22.9kV (최대부하 조건)	지중선로	수도권	지하	0.14	A
			지상	0.07	A
		수도권의	전철	-1.27	A
			비전철	-1.17	A
	가공선로	수도권	지하	0.26	A
			지상	0.32	A
		수도권의	전철	0.01	A
			비전철	0.01	A
22.0kV (최대부하 조건)	지중선로	수도권	지하	0.14	A
			지상	0.10	A
		수도권의	전철	-1.19	A
			비전철	-1.08	A
	가공선로	수도권	지하	0.26	A
			지상	0.36	A
		수도권의	전철	0.05	A
			비전철	0.05	A
6.6kV (최대부하 조건)	지중선로	수도권	지하	0.62	A
			지상	0.96	B
		수도권의	전철	0.61	B
			비전철	0.27	A
	가공선로	수도권	지하	2.14	C
			지상	2.22	C
		수도권의	전철	1.08	C
			비전철	0.39	B
6.6kV (철도배전 실적 부하율 적용)	지중선로	수도권	지하	0.19	A
			지상	0.27	A
		수도권의	전철	0.26	A
			비전철	0.08	A
	가공선로	수도권	지하	0.66	C
			지상	0.62	B
		수도권의	전철	0.36	B
			비전철	0.14	A

A : 양호, 전압강하 5% 이하
 B : 보통, 전압강하 5% 초과, 10%이하
 C : 보통, 전압강하 10% 초과

표 2의 결과에서 22.9kV와 22kV의 경우에는 지중선로와 가공선로 모두에서 전압강하문제는 발생하지 않았으나 6.6kV의 경우에는 지중선로에서는 수도권 지상구간과 가공선로 수도권 지상,지하, 수도권외 전철구간에서 전압강하가 10%를 초과하는 경우가 발생하였다. 또한 철도 배전계통의 실적부하율 31.7%를 적용한 경우의 시뮬레이션에서도 가공선로를 사용하는 수도권 지하구간에서 전압강하가 10%를 초과하는 경우가 발생하였다.

이에 대한 보완 대책으로, 수전설비 구간 중 30km 이상되는 구간인 지중 및 가공선로 구간을 10%로 축소하여 30km이하의 배전구간으로 구성하는 방안과 선로의 용량을 150(95)mm²으로 개량 증대하는 방안을 검토하였다. PSCAD-EMTDC에 의한 각 방안의 시뮬레이션 결과로부터, 6.6kV 배전선로의 전압강하 해소 대책으로는 배전선의 용량(단면적)증대 또는 수전설비의 간격설정이 유

효하게 적용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

무부하 충전전류에 대한 정량적인 검토를 위해서 본 연구에서는 PSCAD-EMTDC에 의한 시뮬레이션을 실시하였다. 22.9kV와 22kV의 지중케이블의 경우에는 충전전류의 차단한계규정인 31.5A를 초과하는 경우가 발생하였다. 이는 무부하 또는 경부하의 경우에 충전전류 문제로 부각될 개연성이 크다는 것을 의미하고 충전전류는 거리에 비례하는 특성이 있으므로 22.9kV와 22kV 지중선로의 경우에는 한계거리를 명시할 필요가 있다. 이러한 이유로 고압 지중배전 거리에 따른 충전전류 특성을 계산하고 이를 다음 그림 1에 보인다.

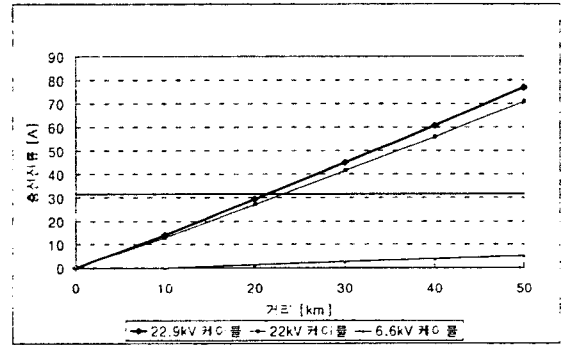


그림 1 배전 거리에 따른 충전전류 특성

위의 그림 1에서 지중케이블에서는 충전전류가 전압에 비례하고 배전거리에 비례함을 알 수 있다. 무부하의 경우에 충전전류의 한계치에 해당하는 배전거리는 22.9kV와 22kV의 경우에 각각 22km와 24km이고 6.6kV의 경우에는 50km 이상이다.

3. 경제성과 신뢰성에 기초한 철도배전 구성 방안

3.1 배전계통 구성대안

수전방식과 배전선로의 구성방법에 따라 가능한12가지 대안들 다음과 같이 선정하였다.

표 3 배전계통 구성 대안

구분	수전선로	배전선로	선로 가설방식	비고
대안 1	1-1	각역 2회선	-	
	1-2	각역 1회선	-	
	1-3	각역 1회선	-	비상발전기-UPS
대안 2	2-1	각역 1회선	1회선	가공
	2-2	각역 1회선	1회선	지중
대안 3	3-1	각역 1회선	1회선	가공
	3-2	각역 1회선	1회선	지중
대안 4	4-1	3개역 1회선	1회선	가공
	4-2	3개역 1회선	1회선	지중
대안 5	5-1	Group 1회선	2회선	가공
	5-2	Group 1회선	2회선	지중
	5-3	Group 1회선	2회선	가공+지중

3.2 대안들의 공급신뢰도 평가

앞서 구성한 12가지의 철도 고압배전계통 구성(안)들에 대한 공급신뢰도를 평가하였다. 본 연구에서는 Fault Tree이론을 이용한 Item Software Ltd에서 개발한 신뢰성 해석프로그램 FTA(Fault Tree Analysis)를 이용하였다.

표 4 대안들에 대한 신뢰도지수 [정전횟수/년]

구분	수전방식	배전선로	선로방식	신뢰도 [정전횟수/년]
대안 1	1-1	각역 2회선	-	0.114636
	1-2	각역 1회선	-	0.327000
	1-3	각역 1회선	-	비상발전기+UPS 0.481836
대안 2	2-1	각역 1회선	1회선	가공 0.165873
	2-2	각역 1회선	1회선	지중 0.154859
대안 3	3-1	격역 1회선	1회선	가공 0.309983
	3-2	격역 1회선	1회선	지중 0.288569
대안 4	4-1	3개역 1회선	1회선	가공 0.441403
	4-2	3개역 1회선	1회선	지중 0.411430
대안 5	5-1	Group 1회선	2회선	가공 0.159830
	5-2	Group 1회선	2회선	지중 0.153519
	5-3	Group 1회선	2회선	가공+지중 0.152968

계산결과, 신뢰도 측면에서는 대안 1-1과 대안 5-3이 가장 좋은 안으로 평가되었다. 그러나 대안 1-1은 각역에서 서로 다른 이중전원 2개를 수전받는 조건이므로 현실적으로 불가능하다. 따라서 신뢰도가 특히 요구되는 복선구간에서는 Group별 수전과 함께 배전선로 2회선으로 구성하는 방안이 타당한 것으로 평가되었다.

3.3 대안들의 경제성 평가

최적의 방식을 선정하기 위해서는 각 대안(방식)에 대하여 소요되는 비용들에 대하여 다음 사항을 차례로 계산하여야 한다.

- ① 경제적 변수의 결정
- ② 설계건설단가 조사
- ③ 운전유지보수 비용 조사
- ④ 각 대안에 대한 총비용 계산
- ⑤ 최적 대안 결정

본 절에서는 이들 각각의 계산과정과 그 결과에 대하여 다룬다. 시설물에 대한 투자사업은 수년도에 걸친 기간을 대상으로 수립되는 것이므로 여기에는 물가상승(Inflation)을 고려해야 한다. 보통 물가상승률은 10년에서 30년 단위까지 일정한 값을 가지므로 식(1)로 계산되는 Uniform Inflation에 대한 평균화 계수(Lavelling Factor :LF)로써 반영한다.

$$LF = \frac{1 - \left[\frac{(1+a)}{(1+i)} \right]^n}{(i-a)} \cdot CRF \quad (1)$$

단, LF : 평균화 계수 [%]

i : 할인율

a : 물가 상승률

CRF : 자본회수 계수 [%]

식(1)에서 자본회수 계수(Capital Recovery Factor; CRF)는 초기 투자비의 현재가치액을 수명년수로 균등화한 비율이며 이는 식(2)로 계산된다. 이때 설비의 잔존가치를 공제하여 적용하는 것이 일반적이다.

$$CRF = \frac{A}{P} \times 100 = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \times 100 \quad (2)$$

여기서, P : 초기 투자비의 현재 가치액

A : P를 회수하기 위한 기간중의

매년 회수금액

제세 및 보험료는 자산가액에 대한 제세, 보험료의 집행실적비율로 계산하며, 설계 및 건설비는 제세 및 보험료를 포함한 고정비율로 계산한다.

고정비율(Fixed Charge Rate ; FCR)은 식 (2)의 자본회수비율과 법인세율의 합이며, 이는 다음 식 (3)과 같이 계산된다.

$$FCR = CRF + TAX \quad (3)$$

여기서, FCR : 고정비율 [%]

TAX : 법인세율 [%]

이와 같이 계산된 평균화계수와 자본회수계수 및 고정비율은 계획의 각 대안에 대한 연간 설계·건설비와 운전유지보수비용 계산을 위한 경제적 변수로 사용되며 이에 대한 구체적인 계산과정은 다음과 같다.

먼저 매년도 각대안의 설계·건설비를 나타내는 고정비는 식(4)로 계산된다.

$$FIXCOST(t, j) = CPT \times FCR \quad (4)$$

여기서, FIXCOST(t, j) : t년도의 고정비

CPT(j) : 설비의 건설비 [원]

변동비는 식(5)와 같이 해당년도의 운전유지보수비용에 평균화계수를 곱함으로써 물가상승률을 반영하여 계산할 수 있다.

$$VARCOST(t, j) = F(t, j) \times LF \quad (5)$$

여기서, F(t, j) : t년도의 운전유지보수비

VARCOST(t, j) : t년도의 변동비

LF : 평균화 계수

결국 매년도의 각 대안에 대한 총 소요비용은 설계·건설비를 포함한 고정비와 운전유지보수비에 의한 변동비의 합으로 구성된다. 최적 급전방식은 대상기간동안 각 대안의 매년도 비용의 합을 최소로 하는 대안 j를 결정하는 것이므로 목적함수 \mathcal{F} 는 식(6)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 \mathcal{F} &= \min_j \sum_i [FIXCOST(t, j) + VARCOST(t, j)] \\
 &= \min_j \sum_i [CPT(j) \times FCR + F(t, j) \times LF]
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

이상과 같이 각 대안의 고정비와 변동비를 수명기간 동안 현가화한 금액을 계산하여 비교하였다. 그림 2는 배전계통전압을 현재와 같이 유지하는 경우이고, 그림 3은 배전계통 전압을 22.9kV로 승압하는 경우이다.

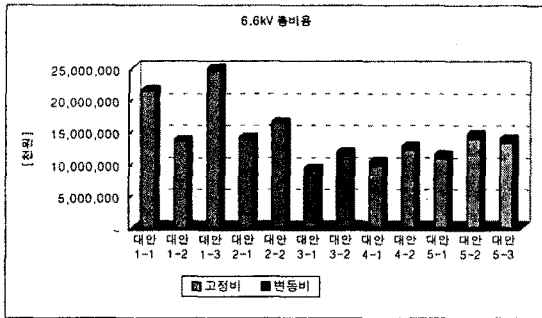


그림 2 경제성 평가 결과(배전전압이 6.6kV인 경우)

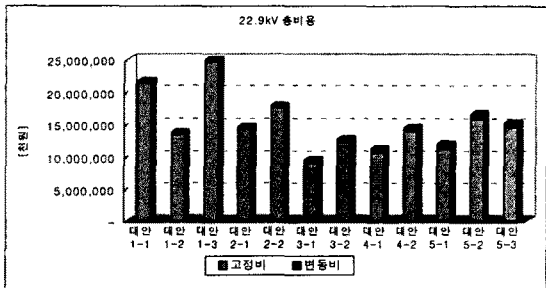


그림 3 경제성 평가 결과(배전전압이 22.9kV인 경우)

최소의 비용으로 구성할 수 있는 철도 고압배전계통은 6.6kV인 경우 대안 3-1(격역 1회선 수전, 가공선로 1회선 포설), 대안 4-1(3개역 1회선 수전, 가공선로 1회선 포설), 대안 5-1(그룹별 1회선 수전, 가공선로 2회선 포설), 그리고 대안 3-2(격역 1회선 수전, 지중선로 1회선 포설) 순이었으며, 이는 22.9kV의 경우도 동일한 결과를 얻었다.

4. 결 론

본 연구에서는 철도 배전계통의 방식을 계통의 전력 공급성능 측면, 경제성 측면, 신뢰도 측면으로 검토하여 철도 배전계통의 구성 대안들을 평가하였다.

전력공급성능 측면에서, 22.9kV와 22kV의 경우에는 지중선로와 가공선로 모두에서 전압강하문제는 발생하지 않았으나, 6.6kV의 경우에는 실적부하율을 적용한 경우의 시뮬레이션에서 가공선로를 사용하는 수도권 지하구

간에서 전압강하가 10%를 초과하는 경우가 발생하였다. 이에 대한 보완 대책으로, 6.6kV 배전선로의 용량(단면적)증대 또는 수전설비의 간격축소설정이 유효하게 적용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

공급 신뢰성 검토결과에서는, 신뢰도가 특히 요구되는 복선구간에서 Group별 수전과 함께 배전선로 2회선으로 구성하는 방안이 타당한 것으로 평가되었으며 경제성 평가 결과에서는, 수전방식은 격역별 1회선 수전하고, 배전선로로써 가공선로 1회선을 포설하는 대안이 가장 우수한 것으로 평가되었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 전기철도설비 관리규정, 양병남, 1999
- [2] 전기업무자료 제8호, 철도청, 2001
- [3] 受電設備, 日本鐵道電氣技術協會, 1995
- [4] 配電線路設備, 日本鐵道電氣技術協會, 1996
- [5] 配線設備, 日本鐵道電氣技術協會, 1994
- [6] 최신송배전공학, 송길영, 2000
- [7] 한국전력 표준구메시방서, ES150, 한국전력공사, 2000
- [8] 산업선 전기설비노후도에 따른 최적의 개량방안 연구 1997. 12.
- [9] 신뢰도지수를 고려한 배전계통의 최적 전력전송경로 결정, 전기학회논문지, 제48-A, 1999. 3.

본 연구의 내용은 철도청에서 시행한 연구용역(2001.6-2001.10) 결과의 일부임